

BHの直接観測の理論整備

—— 相対論的な意味でBH観測とは？ ——

齊田浩見（大同大学）

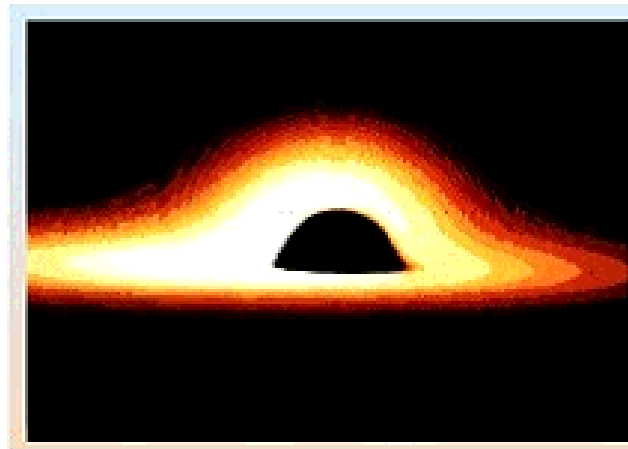
第8回BH磁気圏研究会 at 広島大学, 2015.3.2-4

1. 導入：BHを見たい

1.1 BHシャドウ

- 視覚的な直観に訴える観測

→ BHシャドウ



Fukue & Yokoyama
(1988)

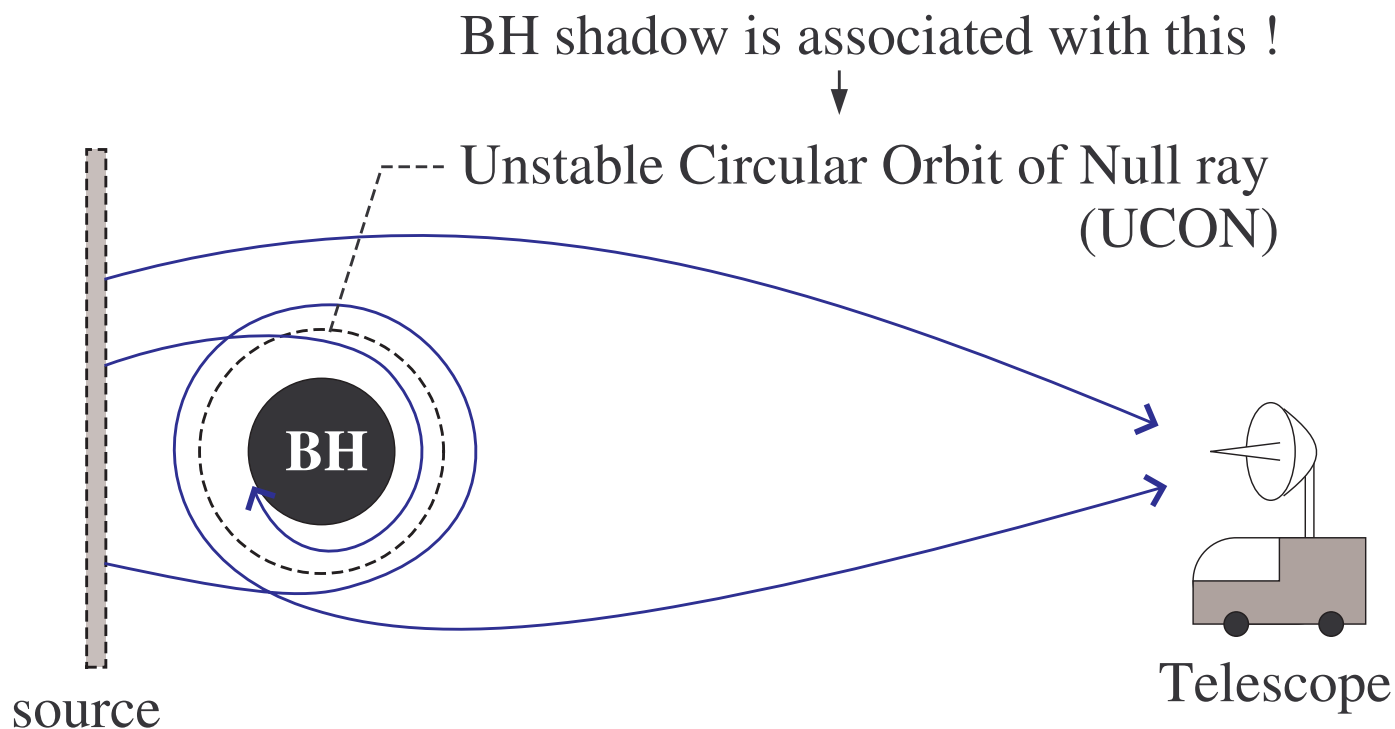
幾何光学近似
で描いた画像

見えたら楽しいし、画像としてインパクトあり。

→ 撮像が現実味を帯びてきたらしいので、

『BH直接観測』を**相対論的に(再)検討**しよう。

- BHシャドウ → 物理的には**BHの吸収断面積**
 - **BHシャドウ輪郭は光の不安定円軌道で決まる！**
- BH地平面なしでも光の不安定円軌道があれば、
疑似BHシャドウが見える可能性あり！





シャドウ撮像における原理的な留意点

シャドウの撮像が一般相対論的な意味で直接的に示すことは、

- 光の不安定円軌道の存在であり、
- BH地平面の存在ではない。

◇ 一般相対論の枠組みで、『疑似BHシャドウを生成できる天体』が理論的に存在し得ることに注意。

坂井・斉田・玉置, Phys.Rev.D90 (2014) 104013

藤澤・斉田・柳・南部, Class.Quant.Grav. to appear

1.2 論点

- 以下，次の2つを議論する：

(A) シャドウの撮像はどの程度，
BH存在の証拠となり得るか？

(B) 相対論的に『BH直接観測』とは何なのか？

– 『BH直接観測』の相対論的な定義は？

– 何を持って『BH存在は確かだ』と言えるか？

→ さらに，今進めているアイデア・計算の報告

2. BHとシャドウ

2.1 BH疑似天体

- BH疑似天体（共通認識ではないかも・・・ 斉田の定義）

光の不安定円軌道を持つが

BH地平面は持たないようなコンパクト天体

→ BH疑似天体が自ら放射を出さなければ，
BHと同じシャドウを生成することが可能。

- 理論の課題：**BH疑似天体の存在/非存在条件
を明らかにすること**

● 球対称な完全流体球について分かっていること：

[藤澤・斉田・柳・南部 , Class.Quant.Grav. to appear]

仮定：時空と物質の形状 → 球対称・静的

物質状態 → 完全流体・順圧な状態方程式
かつ 音速 \leq 光速

⇒ 流体球の質量： M_* ，半径： R_* として，

{ 半径 R_* 以下：
Einstein 方程式で決まる流体の平衡状態。
半径 R_* 以上：
Schwarzschild 時空の R_* 以上と同じ。

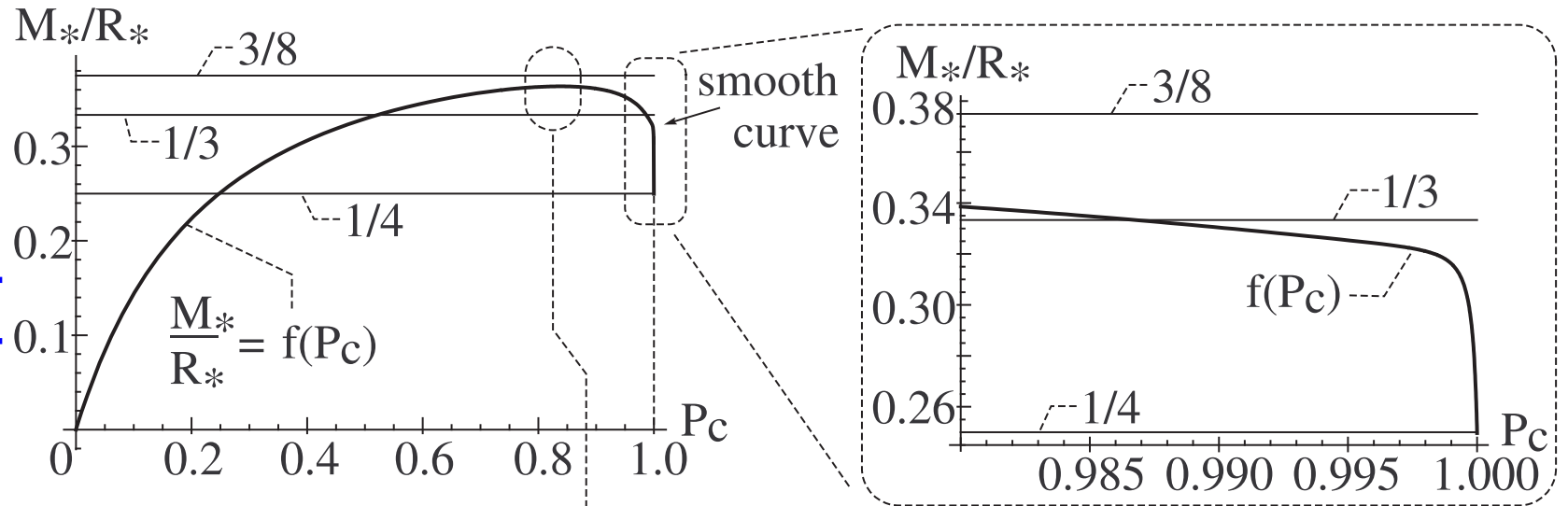
中心密度， G ， c で無次元化して …

$\Rightarrow 3M_* < R_* \left(\Leftrightarrow \frac{M_*}{R_*} < \frac{1}{3} \right)$ が成り立つか？

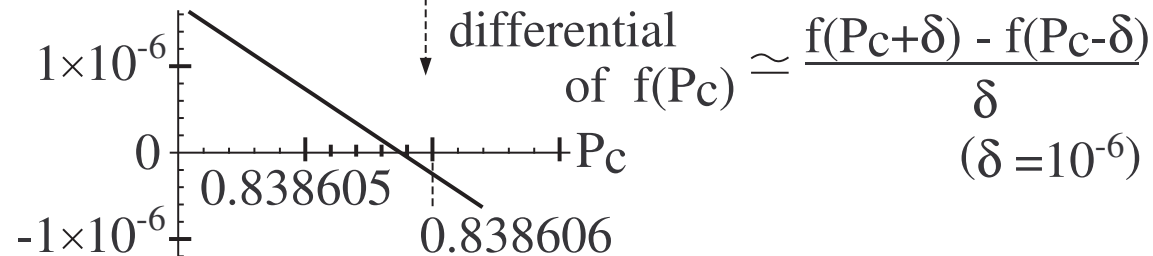
(Schwarzschild 時空の光の不安定円軌道 : 半径 $R_* = 3M_*$)

結論 :

各 P_c での
 $\frac{M_*}{R_*}$ 最大値



$P_c : \frac{\text{中心圧力}}{\text{中心密度 } c^2}$



今の仮定の下では, BH疑似天体が存在し得る!

2.2 ポリトロープ球の場合

- 発想：先の仮定に加えて …

状態方程式をポリトロープに限定するとどうか？

$$\underline{P(\Sigma) = P_c \Sigma^{1+1/n}} \quad (\text{中心密度で無次元化})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c : \text{中心圧力} \\ \Sigma : \text{質量密度} \quad 0 < \Sigma \leq 1 \\ n : \text{ポリトロープ指標} \end{array} \right.$$

- ◇ Nilsson-Uggla(2001) :

$n < 5$ で M_* と R_* は almost of all 有限値。

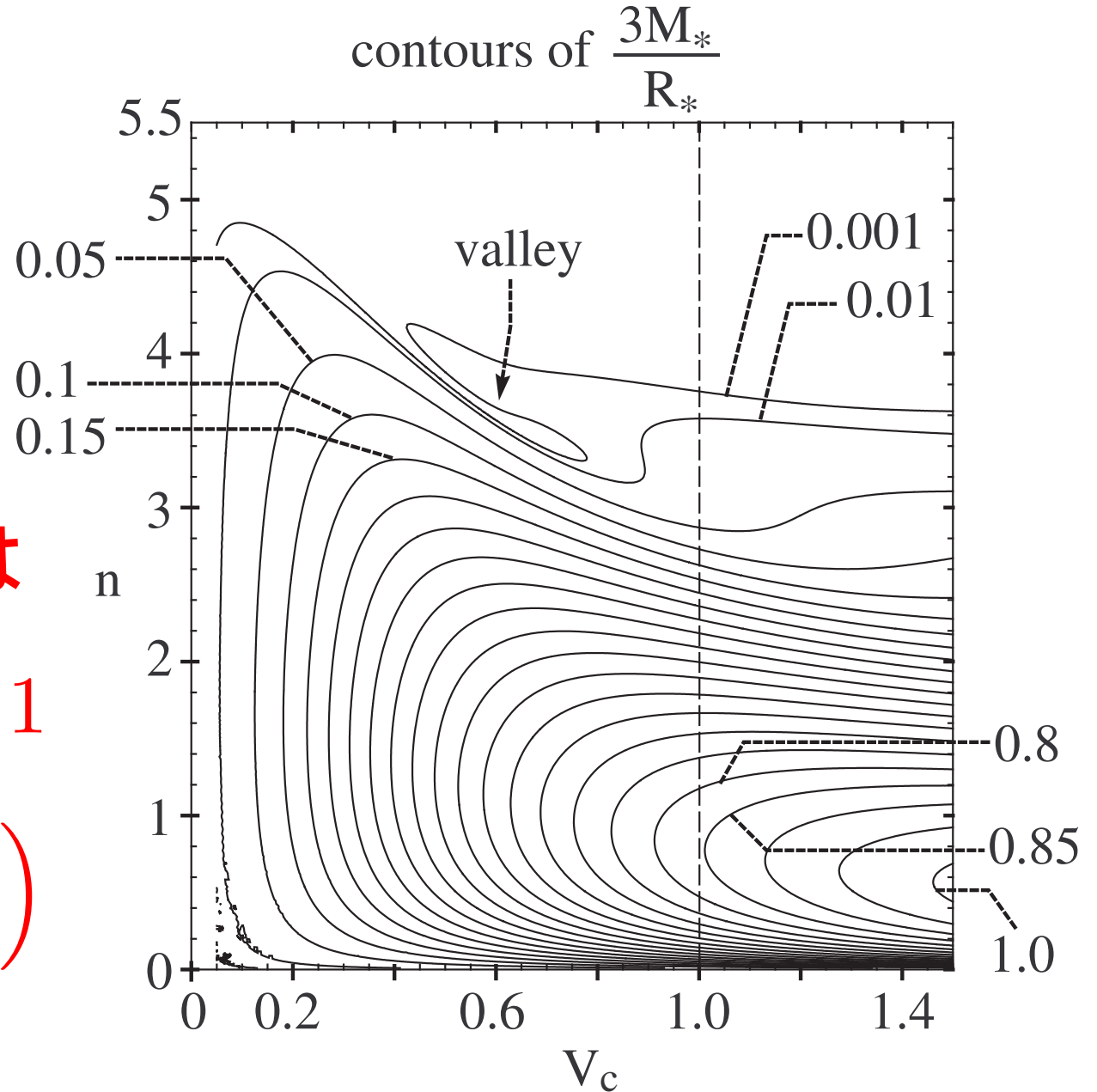
結論：

斉田・藤澤・柳・南部 — will be submitted to CQG

V_c : $\frac{\text{中心音速}}{\text{光速}}$

$$= \sqrt{P_c \left(1 + \frac{1}{n}\right)}$$

光の不安定円軌道は
現れない! $\frac{3M_*}{R_*} < 1$
($\Leftrightarrow 3M_* < R_*$)



2.3 理解の現状

BH疑似天体の存在/非存在条件

ポリトロープがコンパクト天体の状態方程式として良いモデルであれば, BH疑似天体は存在しない (BHシャドウ撮像はBH存在の良い証拠) と考えてよさそう。

◇ { 他の状態方程式
自転するBH疑似天体

などの評価は,

今後の研究が必要。

3. BH直接観測の相対論的な定義

そもそも、BH直接観測とはどういうことか？

3.1 BH時空の剛性定理と一意性定理

BH地平面の剛性定理

BH地平面の回転角速度は「緯度」や「経度」によらず一定である。つまり、BH地平面の回転は剛体回転である。





BH時空の一意性定理

BH時空（の形）は，次の3つのパラメータだけで一意的に決まる（適切な仮定の下で）。

M : 質量

J : 自転の角運動量

Q : 電荷

◇ 以下 $Q = 0$ とする。

3.2 BH 直接観測の定義

- $\left\{ \begin{array}{l} \text{BHは相対論的な存在} \\ \text{BH時空の一意性定理} \end{array} \right.$ を踏まえた定義：

BH 直接観測

BHの曲がった時空の効果を直接観測して、

M : 質量

a : 自転パラメータ ($a := \frac{J}{Mc}$)

を測定することが、BHの直接観測である。

↓ BH疑似天体の可能性を踏まえると・・・



- BH疑似天体の可能性を踏まえると …

様々な手法を用意して多角的に観測することで、
BH疑似天体の可能性を潰しつつ、『BH直接観測』
を実現することが望まれる。

様々な手法 …

- BHシャドウ
- 鉄輝線
- QPO?

… 他はないのか？

4. 一つの望遠鏡でBH直接観測

4.1 どうしたいか？

- BHシャドウ → VLBI観測で写真を撮る

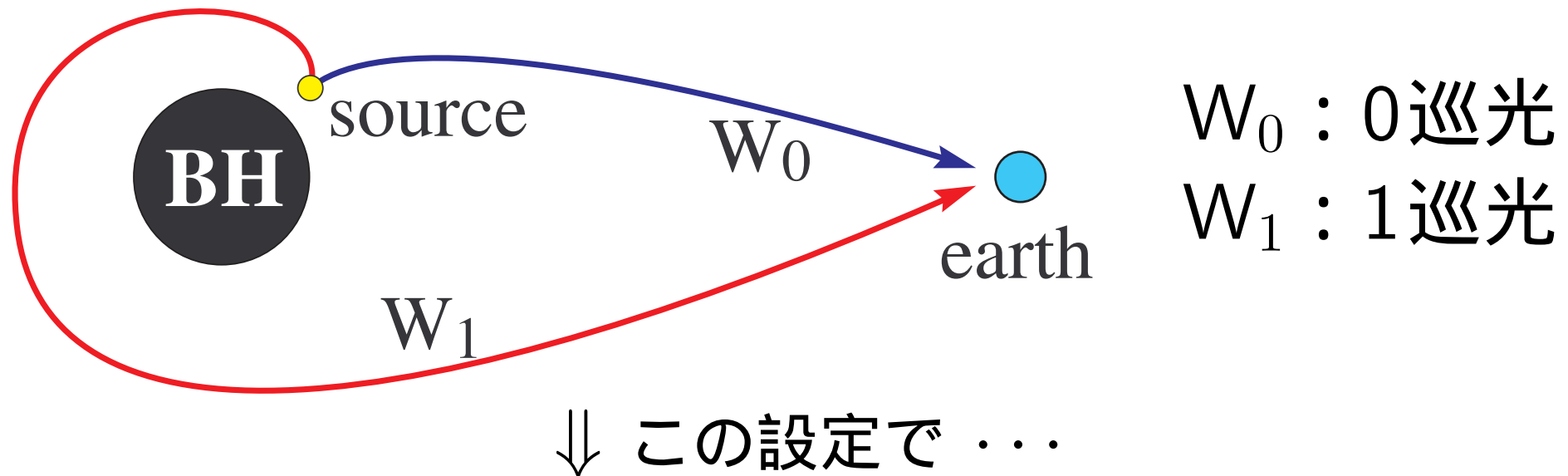
強み：視覚的に強いインパクト

弱点： { 複数の電波望遠鏡が必要になる。
現実的には時間平均した画像になる。

この強みと弱点を逆にすることを考えよう

4.2 基本アイデア

- 注目する相対論効果：**強い重力レンズ効果**
- 観測したい状況：
 - ◇ **BH周辺は光源以外クリアな環境**
 - ◇ **光源から見て等方バースト的な発光**

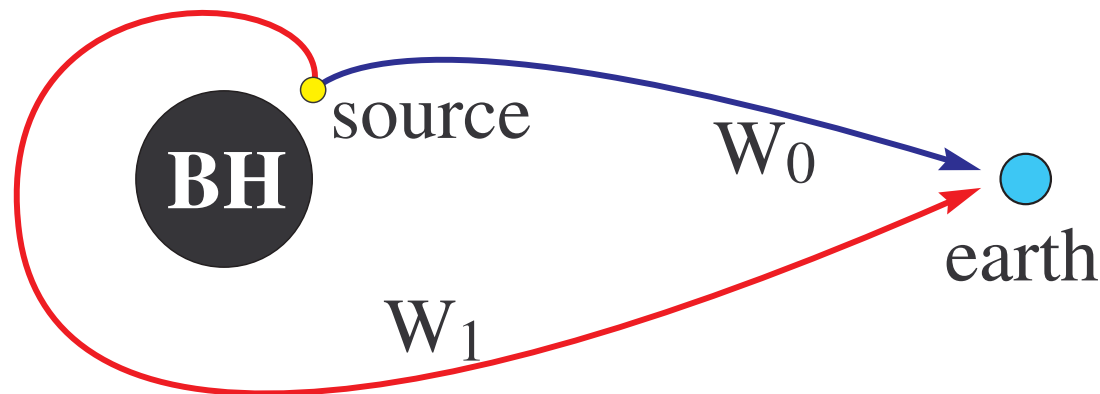




BH 直接観測の基本アイデア

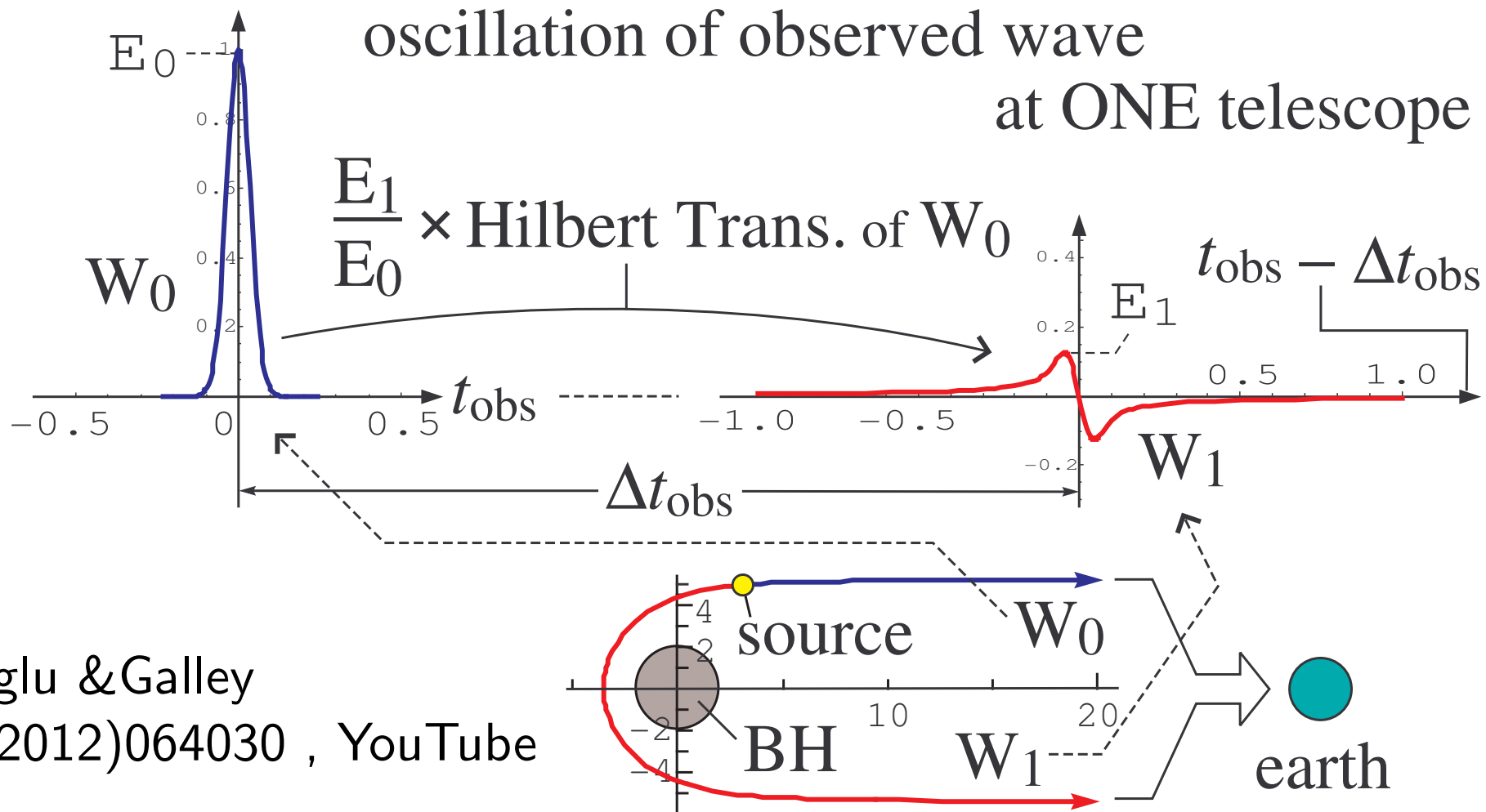
W_0, W_1 の
二つの観測量 : $\begin{cases} \Delta t_{\text{obs}} & : \text{検出時間の差} \\ \mathcal{E}_{\text{obs}} = \frac{E_1}{E_0} & : \text{検出電場の振幅比} \end{cases}$

から, BH 質量 M , 自転パラメータ a を得る。



4.3 例：ガウス型波形の放射

- Gouy phase shift が顕著に見える

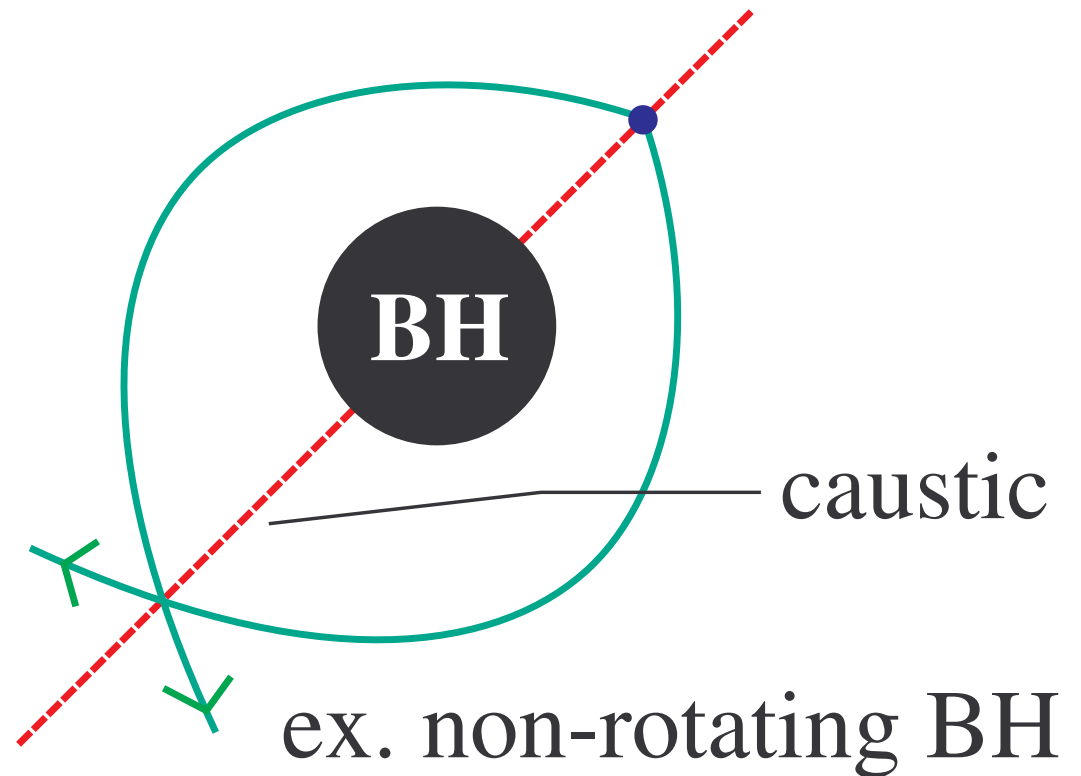


Zenginoglu & Galley
PRD86(2012)064030 , YouTube

- **Gouy Phase Shift** : 波動光学の一般論

光線が火面 (caustic)
を通過するごとに、
波の位相がずれる。

→ 次ページ



- ◇ 火面（光線が交差する位置の集合）では幾何光学近似が破たん。波数による摂動展開の次数を上げて位相を計算すると分かる。



◇ 光線が火面 caustic を1回通過する毎に，

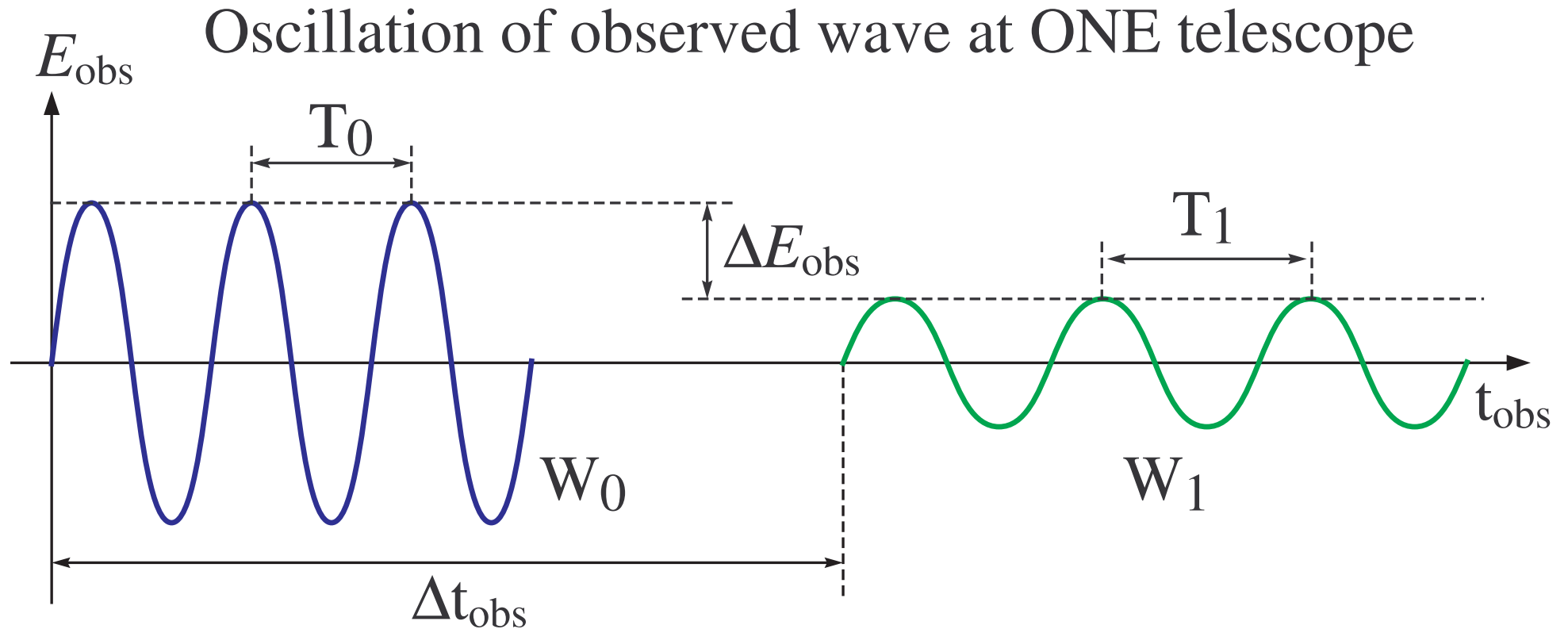
正周波数 Fourier成分：位相が $-\frac{\pi}{2}$ ずれる。
負周波数 Fourier成分：位相が $+\frac{\pi}{2}$ ずれる。

◇ 数学的には Hilbert 変換で表現可：

$$H[f](t) \propto \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} dz \frac{f(z)}{t - z}$$

◇ 注意：スペクトルは変わらない

- 一つのフーリエ成分に注目



$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_{\text{obs}}, \Delta E_{\text{obs}} : \text{BHの強い重力レンズ効果} \\ T_0 \neq T_1 : \text{光源速度のドップラー効果} \end{array} \right.$





求めるべきパラメータが3つ（以上）だった！

M : BH質量

a : BH自転パラメータ

$T_0 - T_1$: 光源速度

→ きっと，光源の位置の依存性もある？

BH物理量（ M, a ）だけでなく，光源運動（位置，速度）の依存性も考慮して，BH直接観測の戦略を練らなければならない。

4.4 一人時間差相関

Step1: データコピー : A, B

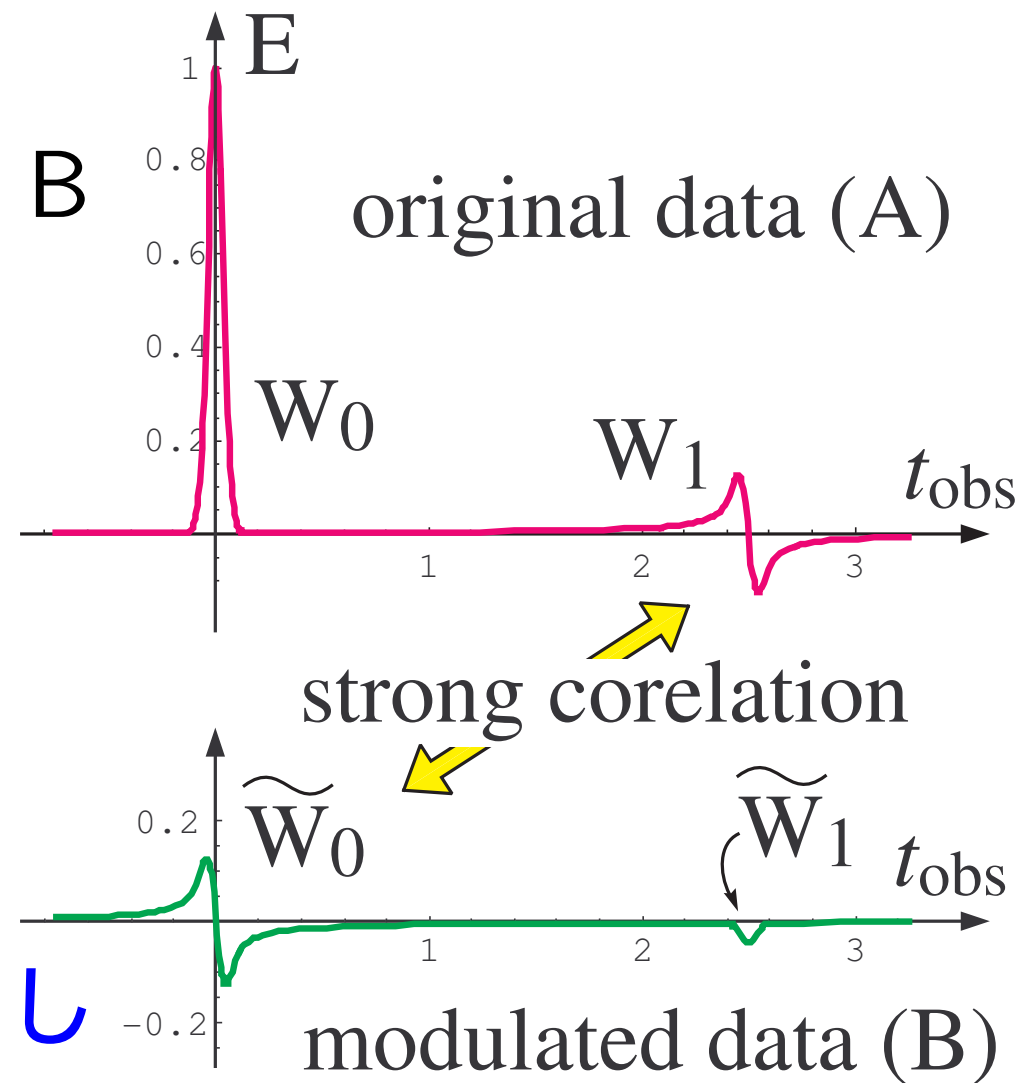
Step2: データBの変調

- ◇ Hilbert変換
- ◇ 定数倍 (ε_{obs})
- ◇ ドップラー効果補正

Step3: AとBの相関評価

相関を得るまで2, 3繰り返し

→ W_0, W_1 が見つかり, $\Delta t_{\text{obs}}, \varepsilon_{\text{obs}}, T_1/T_0$ を得る



4.5 計算中

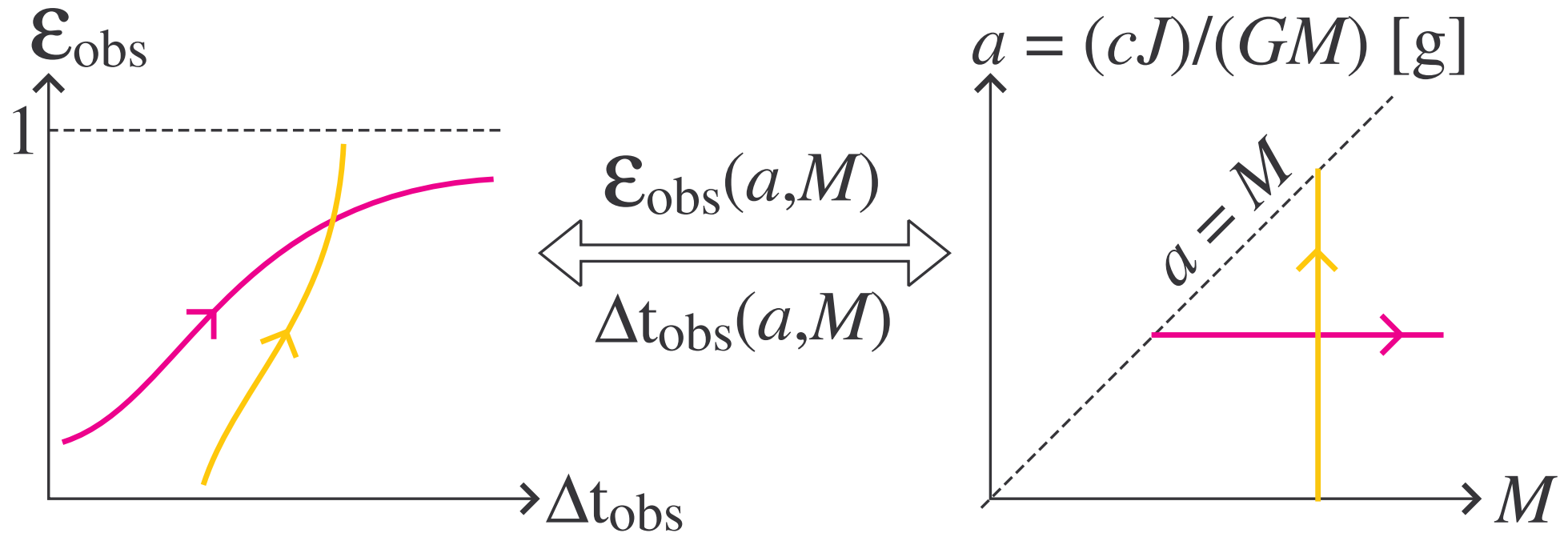
- 前提 { 光源の位置, 速度
光源のスペクトル
観測者からBHの見込み角, 観測周波数
を与えて,

対応表: $M, a \leftrightarrow \mathcal{E}_{\text{obs}}, \Delta t_{\text{obs}}$

を計算したい。



↓ こんな図を描きたい



by definition : $\epsilon_{\text{obs}} < 1$, $0 < \Delta t_{\text{obs}}$, $a < M$

- 前提条件の値を振ることによって、観測量が光源の位置へどう依存するかも確認できる。

- 数値計算のハードル： W_0, W_1 を如何に得るか？

時間を遡る ray tracing ではなく，
光源から出る光の測地線方程式を
未来方向に解いてデータを計算。

- ◇ 齊田のPC (CPU 2.6GHz , メモリ 16GB) で
47時間の数値探査結果 (計算中も業務的使用を並行)

→ 2時間の計算時間で得られる結果と
あまり変わらなかった …

計算方法をさらに工夫する必要あり。

5. まとめ

- 『BH直接観測』の定義は 『曲がった時空の効果の直接検出で M と a を測ること』
- 強い重力レンズ効果が直接示すことは、
BH地平面でなく光の不安定円軌道の存在。
- 一般相対論的に、BH疑似天体の
存在可能性が潰せ切れていない。
- BH疑似天体の可能性を潰していく原理の提示と、
それを踏まえた観測を計画する必要あり。